5К

УДК 004.8

А.Ю. Кольцов, А.В. Просекова, Л.А. Савин, Д.В. Шутин
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Государственный университет –
учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел, Россия
Россия, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Применение методов искусственного интеллекта для обеспечения устойчивости движения роторных систем

A.J. Koltsov, A.V. Prosekova, L.A. Savin, D.V. Shutin
*Federal State Budget Institution of Higher Education "State University –
Teaching, Research and Production Complex"*
302020, Orel, Naugorskoe highway, 29

Use of Artificial Intelligence Methods to Ensure the Stability of Motion of Rotor Systems

О.Ю. Кольцов, А.В. Просекова, Л.О. Савін, Д.В. Шутін
Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти
«Державний університет – навчально-науково-виробничий комплекс», м. Орел
Росія, 302020, м. Орел, Наугорське шосе, 29

Застосування методів штучного інтелекту для забезпечення стійкості руху роторних систем

В статье приведен анализ задачи обеспечения устойчивости движения роторных систем в условиях возникновения колебаний различных типов и рассмотрена возможность применения для ее решения методов искусственного интеллекта. Значительная сложность и недостаточное количество исследований анализа колебаний сложной природы, возникающих при работе высокоскоростных роторных систем, делает неэффективным применение стандартных подходов к синтезу систем управления подобными системами. Предложенный подход позволяет решить ряд принципиальных трудностей в этом направлении и добиться приемлемых результатов в отсутствие адекватных формальных моделей возникновения сложных колебательных процессов в роторных системах.
Ключевые слова: роторная система, динамика роторных систем, активное управление, распознавание образов.

In the article, the problem of ensuring the stability of motion of rotor systems in different types of oscillations is analyzed and the possibility of its solution using methods of artificial intelligence is considered. A significant amount of complexity and lack of research on the analysis of the complex nature of the oscillations that occur when working high-speed rotor system makes inefficient use of standard approaches to the synthesis of control systems of such systems.The proposed approach allows solving some fundamental problems in this area and to achieve acceptable results without adequate formal models of complex oscillatory processes in rotar systems.
Key Words: rotor system, dynamic of rotor systems, activity control, pattern recognition.

У статті наведено аналіз задачі забезпечення стійкості руху роторних систем в умовах виникнення коливань різноманітних типів і розглянуто можливість використання для її вирішення методів штучного інтелекту. Значна складність і недостатня кількість досліджень аналізу коливань складної природи, що виникають під час роботи високошвидкісних роторних систем, робить неефектним використання стандартних підходів до синтезу систем управління подібними системами. Запропонований підхід дозволяє вирішити ряд принципових труднощів у цьому напрямку і досягти прийнятних результатів за відсутності адекватних формальних моделей виникнення складних коливальних процесів в роторних системах.
Ключові слова: роторна система, динаміка роторних систем, активне керування, розпізнавання образів.

Введение

В процессе работы ротора на подшипниках жидкостного трения неизбежно возникают колебания, вызванные действием как внешних, так и внутренних сил. Служащие причиной возникновения сил, вызывающих колебания роторов на подшипниках скольжения, факторы можно разделить на три основные группы:

1 Конструктивные.
2 Технологические.
3 Эксплуатационные.

Возникающие в роторных системах колебательные процессы могут привести к потере устойчивости движения и выходу системы из строя. Чтобы не допустить или хотя бы свести вероятность возникновения подобных ситуаций к минимуму требуется осуществлять активное управление движением ротора с целью компенсации возникших под действием различных факторов колебательных процессов.

В работах по анализу динамики роторных систем выделяются следующие типы колебаний:

1 Автоколебания [1].
2 Параметрические колебания [2].
3 Хаотические колебания [4].

Для каждого из вышеперечисленных видов колебаний можно определить класс траекторий движения центра цапфы, по анализу которых можно сделать вывод об устойчивости движения ротора. Анализ условий возникновения различного рода колебаний позволил выработать ряд практических рекомендаций по определению рациональных параметров роторов на подшипниках жидкостного трения, однако выполнение данных рекомендаций не может полностью гарантировать устойчивость движения ротора. По этой причине остается актуальной задача активного управления движением роторной системой. Для обеспечения устойчивости высокоскоростных роторных систем критическое требуется минимизировать время, затраченное на выработку управляющего воздействия для недопущения развития колебательного процесса или его компенсации.

Целью статьи является анализ возможности применения методов искусственного интеллекта для обеспечения устойчивого движения роторных систем.

Интеллектуальное управление роторной системой в условиях возникновения колебаний определенного типа

При анализе траекторий движений центра цапфы принято выделять следующие основные виды траекторий и состояний устойчивости [1]:

1 Точечно-устойчивое состояние (фокус). Такую траекторию описывает центр цапфы сбалансированного ротора и останавливается на кривой подвижного равновесия.

2 Орбитально-устойчивое состояние, при котором центр цапфы описывает повторяющиеся траектории эллиптического вида.

3 «Странный образ» – неустойчиво-ограниченное состояние ротора, характеризующееся незамкнутой, развивающейся в ограниченной области плоскости радиального зазора, траекторией сложной формы.

4 Замкнутые кривые сложной формы.

5 Неустойчиво-неограниченное состояние, при котором ротор работает в неустойчивой области, а траектория движения цапфы представляет собой разворачивающуюся спираль, стремящуюся к границам зазора.

По виду траектории движения центра цапфы можно с некоторой долей уверенности (которая может иметь формальную вероятностную, нечеткую либо иную интерпретацию) сделать вывод о наличие в роторной системе определенного типа колебаний и дать приблизительную оценку параметров данного процесса и вызвавших причин. Здесь следует иметь ввиду, что реальная роторная система в процессе функционирования подвержена колебаниям всех выделенных типов. По этой причине вывод относительно параметров колебательного процесса должен обладать большой степенью неопределенности.

Поскольку множество возможных траекторий движения центра цапфы имеет мощность континуума, невозможно однозначно и точно определить параметры развивающегося в роторной системе колебательного процесса. Тем не менее, посредством математического моделирования динамики роторной системе можно получить изображение траектории движения цапфы в условиях принятия ряда допущений относительно свойств ротора, втулки подшипника и смазочного слоя. При наличии достаточно большого количества построенных по математическим моделям траекторий с учетом различных характеристик элементов роторной системы становится возможным подобрать траекторию, наиболее близкую к реальной траектории центра цапфы управляемой роторной системы. Для каждой из имеющихся траекторий на основе соответствующей математической модели роторной системы возможно подобрать оптимальное управляющее воздействие, компенсирующее влияние развившегося колебательного процесса.

Таким образом, приняв в качестве предположения следующее:

Предположение 1. *Движение ротора в реальной системе соответствует одной из промоделированных ситуаций, следовательно, можно подобрать подходящее управляющее воздействие из имеющегося множества.*

Работы, связанные с моделированием и колебаний, возникающих в роторных системах, ограничиваются анализом причин возникновения колебаний определенного типа. В частности, в [2] проведено моделирование динамики роторной системы с учетом возникновения параметрических колебаний в следствие не осесимметричности вала и не круглой эллиптической формы вала. Ввиду этого можно разбить множество полученных математическим моделированием траекторий на классы эквивалентности по критерию принадлежности к определенному типу колебаний. В таком случае в условиях принятого предположения можно поставить задачу выбора управляющего воздействия как задачу распознавания образа колебаний с последующим выводом наиболее «близкого» управляющего воздействия. В такой постановке решение проводится в четыре этапа:

1 Классификация колебательного процесса по траектории движения центра цапфы.

2 Выделение существенных характеристик образа колебаний.

3 Определение множества «близких» колебаний из базы данных по результатам моделирования.

4 Свертка управляющих воздействий по данному множеству и получение целевого управляющего воздействия.

Пункты 3 – 4 представленного алгоритма вполне соответствуют нечеткой продукционной системе. В этом случае входными данными (предпосылками) будут являться выделенные характеристики колебательного процесса, которым присуща значительная степень неопределенности, и достоверно известные характеристики роторной системы, такие как частота вращения, смазочный материал и т.п., а выводом будет множество соответствующих управляющих воздействий. В качестве свертки, в таком случае, выступает операция дефаззификации.

В качестве алгоритма нечеткого вывода в данном случае представляется целесообразным использование алгоритма Такаги-Суджено с нечеткими продукциями вида:

$$П_i\text{: } \textbf{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } A_{i1} \textbf{ И } \dots \textbf{ И } x_j \text{ есть } A_{ij} \textbf{ И } \dots \textbf{ И } x_m \text{ есть } A_{im},$$

$$\textbf{ТО } y = f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m),\ i = 1, \dots n.$$

В качестве функции f_i можно использовать линейную функцию $f_i = \sum_{j=1}^{m} \alpha_{ij} x_j$, т.е. управляющее воздействие, соответствующее хранимому в базе данных образу колебаний, представляет собой линейную комбинацию параметров образа колебаний, учитывающий вклад каждого из них в формирование общего портрета колебаний.

Управление движением роторной системе в условиях возникновения колебаний различных типов

В том случае, когда предположение 1 не выполняется, то есть на систему одновременно оказывают существенное влияние колебания различных типов, задача значительно усложняется. Если представить наблюдаемый колебательный процесс как суперпозицию колебательных процессов различных типов, то для выработки адекватного управляющего воздействия требуется выделить «чистые» колебания, определить параметры и провести вывод в условиях их совместного влияния. Кривая движения центра цапфы представляет собой нелинейную функцию от внутренних параметров роторной системы, следовательно, не стоит ожидать, что траектория в условиях сопоставимых воздействий колебаний различных типов может быть простой функцией от траекторий в условиях воздействия каждого из колебательных процессов в отдельности. Поскольку на данный момент отсутствуют работы по моделированию динамики роторных систем в условиях одновременного возникновения колебаний различных типов, не представляется возможным разработать алгоритм управления на основании формальной модели портрета колебаний. Ввиду слабой формализации задачу выработки управляющего воздействия в данных условиях следует отнести к сфере искусственного интеллекта [3]. Для выделенных трех типов колебаний можно определить постановку задачи следующим образом:

Пусть на множестве $АЧРЧС$, где $А$, $Р$, $С$ – множества траекторий движения цапфы, соответствующих чистому влиянию автоколебаний, параметрических колебаний и хаотических колебаний соответственно, задана функция g, областью значений которой является все множество возможных траекторий движения центра цапфы. Найти функцию $q = g^{-1}$, раскладывающую действительную траекторию на компоненты, соответствующие траекториям движения центра цапфы в условиях влияния только колебаний одного типа.

Поскольку сведения о виде g и q отсутствуют, выходом из положения является аппроксимация функции q с использованием одного из методов искусственного интеллекта, например, искусственных нейро-нечетких сетей. На вход ИНС подается образ реальной траектории движения центра цапфы, а также образы имеющихся в базе данных образов колебаний. Выходной слой состоит из трех групп узлов, каждая из которых представляет собой нечеткий образ колебания определенного типа. Полученный результат будет являться входными данными для нечеткой продукционной системы.

Для обучения нейронной сети в данном случае применимы алгоритмы «обучения с учителем», образцы для обучения и минимизации функции ошибки получаются непосредственно на следующем временном интервале (данный факт непосредственно следует из того, что функцию ИНС можно интерпретировать как прогнозирование

положения центра цапфы в следующий момент времени). Однако ошибочные управляющие воздействия в процессе обучения ИНС могут привести к негативным последствиям для роторной системы вплоть до выхода ее из строя. По этой причине до испытаний и обучения на реальном агрегате требуется достаточно точно аппроксимировать целевую функцию, то есть требуется некоторый объем априорной информации. Для предварительного обучения ИНС можно предпринять следующие меры:

1 Обучение на математических моделях роторной системы в условиях действия одного типа колебаний. Очевидно, что в данном случае откликом ИНС должен быть образ исходного колебания, отнесенный к определенной группе;

2 Обучение на образах траекторий, полученных в результате коротких запусков роторной системы без активного управления. Поскольку целевое положение центра цапфы можно оценить эмпирически, полученные траектории могут служить образцами для обучения. Отметим, что запуски должны быть достаточно короткими, чтобы избежать разрушения установки.

Выводы

В статье рассмотрена возможность применения методов искусственного интеллекта для обеспечения устойчивого движения роторной системы. Отнесение данной задачи именно к интеллектуальному управлению связано, прежде всего, с нелинейностью возникающих в роторных системах эффектов, что значительно усложняет синтез системы регулирования. Применение методов искусственного интеллекта позволяет решить ряд концептуальных трудностей и обеспечить требуемую виброустойчивость роторной системы.

Литература

1. Савин Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
2. Майоров С.В. Параметрические колебания роторов на радиальных подшипниках жидкостного трения : диссертация на соискание ученой степени к.т.н. / С. В. Майоров. – Орел, 2009.
3. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта / Лорьер Ж.-Л. ; [пер. с франц.] – М. : Мир, 1991. - 568 с.
4. Морозов А.А. Нелинейный анализ колебаний роторов с гидростатодинамическими подшипниками : диссертация на соискание ученой степени к.т.н. / Морозов А.А. – Орел, 2010.
5. Минаев Ю.Н. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе / Минаев Ю.Н., Филимонова О.Ю., Лиес Бенамеур. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2003. – 208 с.
6. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети / Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. – М. : Горячая Линия – Телеком», 2007. – 284 с.

Literatura

1. Savin L.A. Modelirovanierotornyhsistem s oporamizhidkostnogotrenija: monografija. M.: Mashinostr.-1. 2006.
2. Majorov S.V. Parametricheskie kolebanija rotorov na radial'nyh podshipnikah zhidkostnogo trenija. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n.. Orel. 2009.
3. Lor’erZh.-L.. Sistemy iskusstvennogo intellekta: Per. S franc. M.: Mir. 1991. 568 s.
4. 4.Morozov A.A. Nelinejnyj analiz kolebanij rotorov s gidrostatodinamicheskimi podshipnikami. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n..Orel. 2010.
5. MinaevJu. N. Metody i algoritmy reshenija zadachi dentifikacii i prognozirovanija v uslovijah neopredelennosti v nejrosetevom logicheskom bazise. M.: “GorjachajaLinija-Telekom”. 2003. 208 s.
6. Borisov V.V. Nechetkiemodeli i seti. M.: “GorjachajaLinija-Telekom”. 2007. 284 s.

Статья поступила в редакцию 29.08.2012.